

Применение общепромышленных стандартов для построения космических вычислителей

Алексей Медведев

Активно применяемая в зарубежных и отечественных разработках специального назначения COTS-технология является хорошим средством снижения временных и финансовых затрат. В статье рассматривается опыт использования COTS для создания вычислителей, эксплуатируемых на борту космических аппаратов.

В последнее время из-за необходимости сокращения стоимости военных и аэрокосмических систем разработчики стали активно использовать технологию COTS (Commercial Off-The-Shelf – «готовый к использованию продукт»). Смысл данной технологии в том, что для построения систем специального назначения применяется подход, в рамках которого используются промышленные вычислительные модули, а крейты, стойки, блоки коммутации и кабели имеют специальное исполнение и обеспечивают требуемые условия эксплуатации (например, устойчивость к климатическим, вибрационным, акустическим и другим воздействиям). В COTS-технологии применяются готовые аппаратные и программные технологии открытого типа, ранее широко апробированные и/или стандартизованные на рынке общепромышленных гражданских приложений.

Исторически концепция COTS возникла как инициатива министерства обороны США и оборонных ведомств ряда других западных стран, желающих сократить свои расходы за счёт уменьшения доли дорогостоящих уникальных решений и технологий. Для российских разработчиков в настоящее время в условиях усложнения экономической ситуации и введения санкций, перекрывающих доступ к элементной базе оборонного и двойного назначения, такой способ экономии средств на создание аппаратуры с высокими техническими характеристиками особенно актуален.

Общий тренд построения систем на базе стандартизованных COTS-компонентов проник и в космическую отрасль. Тому способствовали чрезвычайно бурный темп освоения космического пространства, усложнение решаемых задач, требования сокращения сроков разработки и модернизации систем, повышение их быстродействия и надёжности. В настоящий момент в космосе постоянно присутствует большое количество обитаемых и необитаемых летательных аппаратов различных стран. Эта отрасль превратилась в мощную индустрию, связанную с исследованиями, производством новых материалов, обороной и другими актуальными задачами [1].

КАК ВЛИЯЕТ РАДИАЦИЯ НА МИКРОСХЕМЫ

В «штуках частиц» космическое излучение состоит на 90% из протонов (то есть ионов водорода), на 7% из ядер гелия (альфа-частиц), ~1% составляют более тяжёлые атомы и ~1% – электроны. Звёзды, включая Солнце, ядра галактик, Млечный Путь, обильно освещают всё не только видимым светом, но и рентгеновским и гамма-излучением. Во время вспышек на Солнце радиация от Солнца увеличивается в 1000–1 000 000 раз, что может быть серьёзной проблемой, как для людей будущего, так и нынешних космических аппаратов за пределами магнитосферы Земли.

Вокруг Земли есть 2 пояса заряженных частиц – так называемые радиационные пояса Ван Аллена: на высоте ~4000 км

из протонов и на высоте ~17 000 км из электронов. Частицы там движутся по замкнутым орбитам, захваченные магнитным полем Земли. Также есть бразильская магнитная аномалия, где внутренний радиационный пояс ближе подходит к Земле до высоты 200 км.

Когда гамма- и рентгеновское излучение (в том числе вторичное, полученное из-за столкновения электронов с корпусом аппарата) проходит через микросхему, в подзатворном диэлектрике транзисторов начинает постепенно накапливаться заряд, и соответственно начинают медленно изменяться параметры транзисторов – пороговое напряжение транзисторов и ток утечки. Обычная гражданская цифровая микросхема уже после 5000 рад может перестать нормально работать (впрочем, человек может перестать работать уже после 500–1000 рад).

На низкой орбите 300–500 км (там, где летают люди) годовая доза может быть 100 рад и менее, соответственно, даже за 10 лет набранная доза будет переносима гражданскими микросхемами. А вот на высоких орбитах >1000 км годовая доза может быть 10 000–20 000 рад, и обычные микросхемы наберут смертельную дозу за считанные месяцы.

Самой большой проблемой космической электроники является столкновение с тяжёлыми заряженными частицами (ТЗЧ) – это протоны, альфа-частицы и ионы больших энергий. ТЗЧ имеют такую высокую энергию, что «пробивают» микросхему насквозь (вместе с корпусом

спутника) и оставляют за собой «шлейф» заряда. В лучшем случае это может привести к программной ошибке (0 становится 1 или наоборот), в худшем — к тиристорному защёлкиванию. У защёлкнутого чипа питание закорачивается с землёй, через него может идти очень большой ток, в результате может сгореть микросхема. Если успеть отключить питание и подключить до сгорания, то всё будет работать, как обычно.

Тяжёлые заряженные частицы космического пространства, воздействуя на интегральные микросхемы (ИМС), могут вызвать искажения отдельных битов данных или программы. Интенсивность сбоев зависит от типа используемой памяти, параметров орбиты и активности Солнца.

Бороться с защёлкиванием можно несколькими способами.

1. Следить за потребляемым током и быстро передёргивать питание.
2. Использовать микросхемы на сапфировой подложке (Silicon-on-sapphire, SOS, в более общем виде Silicon-on-insulator, SOI) — это исключает формирование биполярных паразитных транзисторов и защёлкивание. Программные ошибки, тем не менее, могут быть. Пластины из кремния на сапфире стоят дорого, обрабатывать их сложно, и они имеют ограниченное применение в гражданском секторе, следовательно, производство получается дорогим. В настоящее время в большинстве случаев применяют SOI в общем виде — с оксидом в виде диэлектрика.
3. Использовать так называемый процесс triple-well — он также очень сильно снижает возможность защёлкивания микросхемы за счёт дополнительной изоляции транзисторов p–n-переходом, но не требует каких-то особенных пластин или оборудования, и в результате само производство намного дешевле кремния на сапфире.

Исторически в СССР и России чаще работают с кремнием на сапфире, а на Западе стараются как можно больше использовать обычный кремний с triple-well (чтобы совмещать с коммерческими продуктами и снижать стоимость), но и SOS/SOI тоже делают по необходимости.

В случае когда из-за ТЗЧ в космической аппаратуре произошло искажение содержимого памяти или логика сработала неправильно, бороться с этим остаётся только архитектурными способами, например:

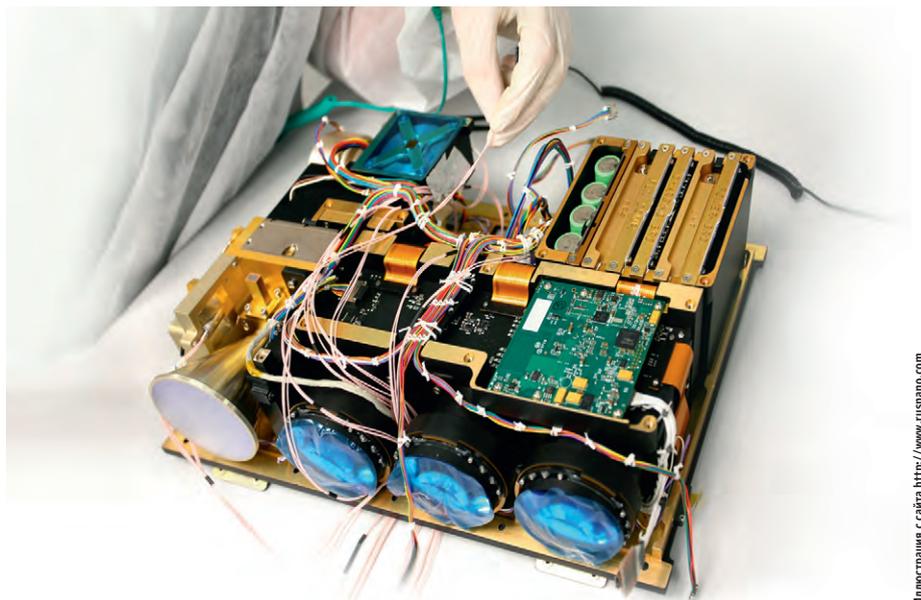


Рис. 1. Спутник стандарта CubeSat компании «Даурия Аэроспейс»

- мажоритарной логикой, когда мы соединяем по 3 копии каждого нужного нам блока на некотором расстоянии друг от друга — тогда 2 правильных ответа «пересылят» один неправильный, использованием более стойких к ошибкам ячеек памяти (из 10 транзисторов вместо обычных 6),

- использованием кодов коррекции ошибок в памяти, кэш и регистрах.

Но полностью от ошибок избавиться невозможно, ведь может случиться, что ТЗЧ (вернее, целый веер вторичных частиц) пройдут точно вдоль чипа, и часть компонентов чипа может сработать с ошибкой. Тут и нужна высоконадёжная система из нескольких независимых компьютеров и правильное их программирование.

В итоге использование гражданских микросхем в космосе ограничено эффектом защёлкивания и возможно в лучшем случае на низких орбитах. На высоких орбитах и в дальнем космосе нужны специальные радиационно-стойкие микросхемы, так как там мы лишены защиты магнитного поля земли, а от высокоэнергетических частиц космической радиации спасёт разве что метр свинца [2]. Сферы применения COTS-технологии должны быть чётко очерчены, их неправильное использование может привести к отрицательным результатам.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ COTS-ТЕХНОЛОГИЙ В КОСМОСЕ

Подтверждением использования в космосе COTS-технологий и промышленной ЭКБ является растущая по-

пулярность спутников, выполненных по стандарту CubeSat.

CubeSat (кубсат) — формат малых (сверхмалых) искусственных спутников Земли для исследования космоса, имеющих объём 1 литр и массу не более 1,33 кг или несколько (кратно) более (рис. 1).

Эти спутники обычно используют шасси-каркас спецификации CubeSat и покупают стандартные комплектующие — COTS-электронику и прочие узлы. Спецификации CubeSat были разработаны в 1999 году Калифорнийским политехническим и Стэнфордским университетами, чтобы упростить создание сверхмалых спутников.

Спецификация CubeSat включает в себя стандартизированные габариты и архитектуру. Все CubeSat подразделяются на размерности 1U (10×10×10 см), 2U (10×10×20 см), 3U (10×10×30 см) и так далее.

Стандарт CubeSat не ограничивает фантазию разработчиков и инженерные подходы для построения космических аппаратов. Здесь не существует общепринятых инструкций по сборке, то есть универсальных стандартов, описывающих информационные, механические или электрические интерфейсы. Есть рекомендации по соответствию габаритов электронных плат форм-фактору PC/104, некоторые подходы к распайке контактов, по информационным шинам и шинам питания, но конкретная реализация у каждого разработчика может быть индивидуальной [3].

Создаются спутники CubeSat из электроники промышленного класса, то есть той, которая предназначена для



Рис. 2. Система стандарта CompactPCI

эксплуатации на Земле и не готовилась для работы в космосе. Несмотря на это, возможности современных чипов позволяют им работать в, казалось бы, неприемлемых условиях. Они могут быть недолговечны, но обеспечивают работоспособность аппаратов до года, а то и в несколько раз больше [4].

ДРУГИЕ COTS-СТАНДАРТЫ CompactPCI

Системы на базе стандарта CompactPCI имеют в своём составе механический конструктив, позволяющий устанавливать процессорные и периферийные модули в пассивную кросс-плату с определёнными стандартом интерконнектами обмена данными между модулями системы. Характеристики конструктивов, типы и топологии используемых интерконнектов хорошо документированы в соответствующем стандарте, разработанном консорциумом международных компаний под эгидой PICMG (www.picmg.org). Пример конструктива приведён на рис. 2. Системы строятся в конструктиве Евромеханика 3U, 6U.

Основные преимущества стандарта CompactPCI:

- возможность построения многопроцессорных гетерогенных вычислительных систем;
- высокая устойчивость к ударам и вибрациям;
- эффективное охлаждение;
- поддержка режима «горячей» замены;
- поддержка резервирования;
- применение стандартных шасси от разных производителей.

Показательный пример надёжности систем, выполненных по стандарту CompactPCI, – система управления марсохода Opportunity, который управляется двумя компьютерами на базе стандарта CompactPCI [5].

На Красную планету марсоход Opportunity прибыл 24 января 2004 года и до сих пор продолжает функционировать.

Ядро системы управления – одноплатный компьютер RAD6000 (производитель BAE Systems), выполненный в формате CompactPCI 6U версии 2.0.

RAD6000 – радиационно-стойкий одноплатный компьютер на базе RISC-процессора, выпущенный подразделением IBM (позже это подразделение стало частью BAE Systems). Компьютер имеет максимальную тактовую частоту 33 МГц и быстродействие около 35 MIPS. На плате установлено 128 Мбайт оперативной памяти с ECC. Обычно на этом компьютере работает ОС PV VxWorks. Частота процессора может устанавливаться в 2,5, 5, 10 или 20 МГц.

В настоящее время рабочая группа PICMG начала разработку новой спецификации Space CompactPCI Serial, в которой учитываются специальные требования к применению в космической технике.

В разрабатываемой спецификации исключены некоторые не востребова-

ные функции с целью сделать стандарт более гармоничным. В то же время добавлены новые свойства, чтобы оптимизировать стандарт Space CompactPCI Serial для космических приложений.

В разрабатываемую спецификацию вносятся два основных нововведения: использование архитектуры «двойная звезда» и интеллектуальной системы управления питанием. Кроме того, дополнительно к Ethernet и PCI Express возможно использование других последовательных интерфейсов, таких как SpaceWire, SpaceFibre, TT-Ethernet и rapid I/O, для взаимодействия плат в системе.

Базовая спецификация CompactPCI Serial определяет топологию «звезда» для межмодульного взаимодействия. В спецификации Space CompactPCI Serial добавляется симметричное дублирование интерконнектов. Таким образом, выход из строя одного центрального процессора никак не сказывается на функциональности системы в целом. Высокая степень готовности очень важна в космосе, так как, например, вы не можете просто заменить процессорный модуль, установленный в спутнике на орбите. В добавление к системному слоту (A) с левой стороны системы второй системный слот (B) размещается в правой части, дублируя все межмодульные связи (рис. 3, [6]). Все семь периферийных слотов подключены к обоим системным, которые также соединены между собой. Эти связи образуют сеть

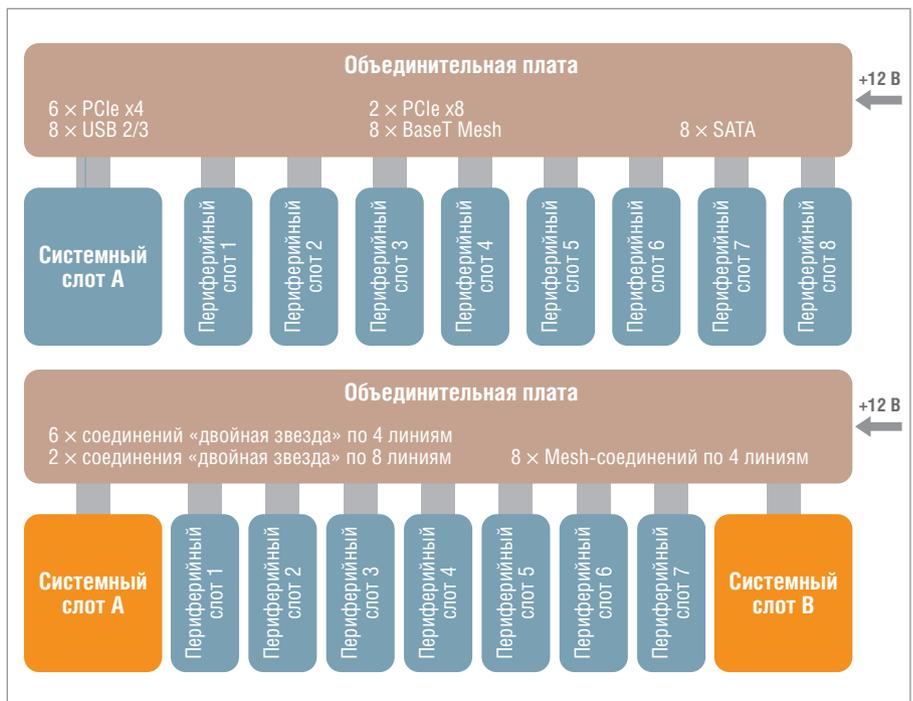


Рис. 3. Space CompactPCI Serial предполагает второй системный слот для реализации топологии «двойная звезда» через PCI Express